

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600091

研究課題名(和文) 多層エピ成長による結晶配向転換を用いた CMOS プロセスの革新

研究課題名(英文) Innovation of CMOS process using crystallographic orientation during multiple-layer epi-growth

研究代表者

末光 眞希 (Suemitsu, Maki)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：00134057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電子・正孔共に同等の移動度を有するSi(110)面とSi(111)面の組み合わせをSi(110)基板の一部に3C-SiC(111)薄膜を介してSi(111)面を成長させることで実現するアイデアを掲げ、その原理検証に取り組んだ。まず、Si(110)基板の上に3C-SiC(111)薄膜が成長する回転エピ成長機構を解明し、これを最適化した。その結果、Si(110)面上に従来法よりX線ロックング半値幅で23%高品質の3C-SiC(111)結晶薄膜をヘテロエピタキシャル成長することに成功し、同薄膜上に、工業的成膜手法であるLPCVD法を用いてSi(111)薄膜を形成することに成功した。

研究成果の概要(英文)： Aiming at realization of a combined Si(110)/Si(111) surface having similar electron (Si(111)) and hole (Si(110)) mobilities, this study pursued development of the Si(111)/Si(110) "rotated" epitaxy by adding a 3C-SiC(111) interlayer in between. As a result, detail of the crystallographic rotation mechanism has been clarified for the first time, whose knowledge was then utilized in the betterment of the SiC(111) film quality by 23 % as measured by the width of the x-ray Rocking curve. By applying a conventional LPCVD method to this film, it was demonstrated that the growth of Si(111) is actually possible on the Si(110) substrate by this technology.

研究分野：半導体薄膜工学

キーワード：3C-SiC ヘテロエピタキシ 積層欠陥 転位 X線ロックング曲線 CMOS

1. 研究開始当初の背景

MOS デバイスはこれまで Si(100)基板上に構築されてきた。それはこの面方位において Si/SiO<sub>2</sub> の界面準位が最小で、その結果、電子移動度が最大だからである。その一方、Si(100)面の正孔速度は電子移動度の約 30% と低く、このため CMOS では NMOS と PMOS の動作速度を合わせるべく、前者をわざと大きく作っており、そのことが CMOS デバイスの更なるスケーリングを阻む一因となっていた。

一方、申請者たちは Si(110)基板上に炭化ケイ素 3C-SiC(111)面が成長するという「回転エピタキシャル成長」現象について研究を行っており、この 3C-SiC(111)面上に再度 Si エピ成長を行うことで、Si(110)基板上に 3C-SiC 薄膜を介して Si(111)結晶をエピタキシャル成長できるのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究は、上記のように申請者らが構築してきた Si 基板上 3C-SiC 結晶薄膜成長、及び Si エピタキシャル技術の最新の成果を組み合わせ、正孔移動度が Si(100)面に比べて 2 倍以上も高い Si(110)基板上に Si(111)結晶をエピタキシャル成長する CMOS 技術を提案し、その原理実証を行うことを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

本研究は、上記の目的を達成するため、(1)Si(100)面上高品質 3C-SiC(111)結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発、(2) 3C-SiC(111)/Si(100)薄膜上 Si(111)結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発を行った。

(1) Si(100)面上高品質 3C-SiC(111)結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発、

Si(110)基板上長 3C-SiC(111)結晶薄膜の断面 TEM 観察。

Si(110)基板上 3C-SiC(111)配向薄膜成長初期過程の高速電子線回折 (RHEED)「その場」観察。

Si 基板上 3C-SiC ヘテロエピタキシャル成長初期工程における固相炭素源による Si 炭化層形成の試み。

(2) 3C-SiC(111)/Si(100)薄膜上 Si(111)結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発

工業的製法である LPCVD 装置を用いて SiC 結晶薄膜上 Si エピタキシャル成長を行い、その結晶性を X 線回折により評価した。

4. 研究成果

(1)Si(100)面上高品質 3C-SiC(111)結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発、

Si(110)基板上長 3C-SiC(111)結晶薄膜の断面 TEM 観察。

(a)回転エピ成長では、回転エピ成長領域

(3C-SiC(111)) 以外に僅かながら非回転エピ成長領域 (3C-SiC(110)) が存在し、両者の境界にドメインバウンダリ (DB) と呼ばれる面欠陥が存在すること、(b)DB は SiC/Si 界面の荒れに起因すること、(c)これら 3C-SiC 薄膜内の構造欠陥は、その上に形成したグラフェン (グラフェン・オン・シリコン : GOS) に欠陥を生じさせること、を明らかにした。(図 1)

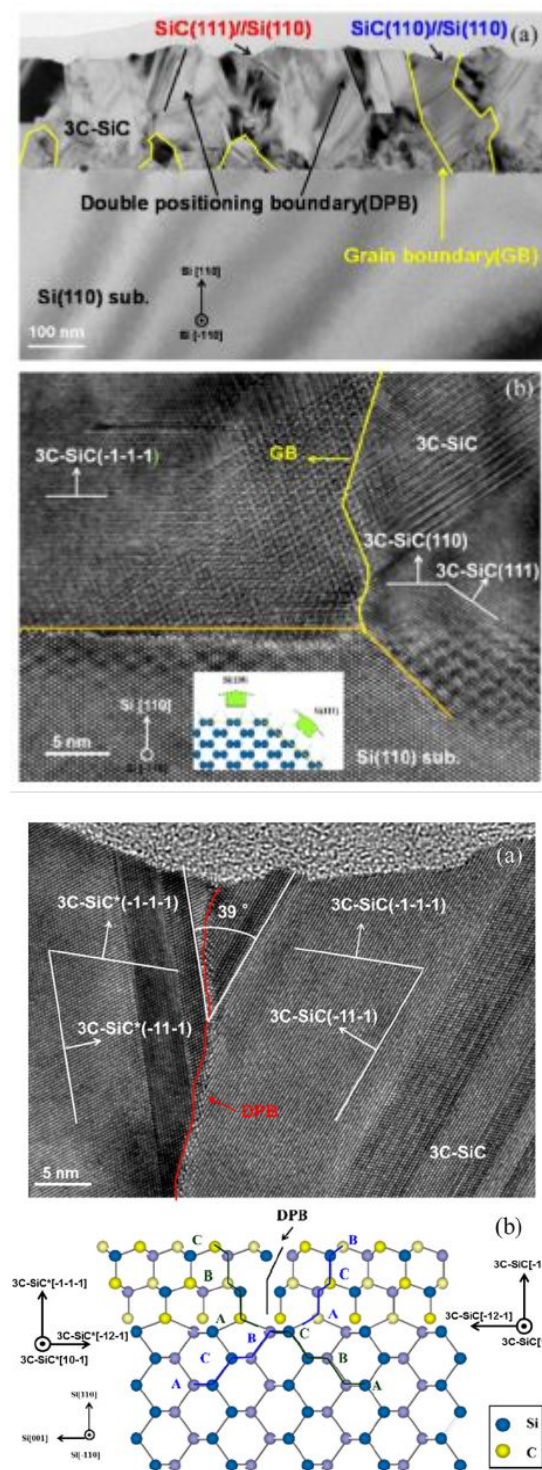


図 1 Si(110)面の荒れた部分 (3C-SiC(111)) に非回転エピ (3C-SiC(110)) が発生する。

Si(110)基板上 3C-SiC(111)配向薄膜成長

初期過程の高速電子線回折 (RHEED)「その場」観察。

回転エピ成長初期過程を RHEED を用いて「その場」観察することに初めて成功し、不定形バッファ層を結晶成長温度まで昇温する過程で結晶方位回転核が発生することを初めて明らかにした。(図2)

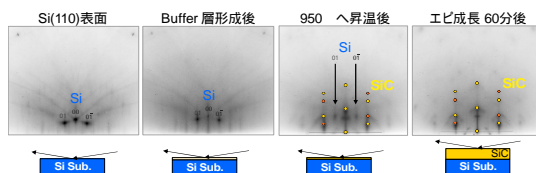


図2 回転エピ成長初期表面の RHEED 観察

Si 基板上 3C-SiC ヘテロエピタキシ成長初期工程における固相炭素源による Si 炭化層形成の試み。

上記の問題を解決する方法として、固相プリカーサによる炭化層形成を試み、同法による炭化層形成に初めて成功した。

こうした知見を基に Si(110) 基板上 3C-SiC(111) 回転エピ成長プロセスの最適化を行い、X 線ロッキング曲線半値幅で評価する結晶性を、従来法に比べ 23%高品質化することに成功した。

(2) 3C-SiC(111) / Si(100) 薄膜上 Si(111) 結晶薄膜のヘテロエピタキシャル成長技術の開発

回転 3C-SiC(111) 基板上に LPCVD 法を用いて Si エピ成長を行い、工業的成膜手法を用いて Si(110) 基板上に 3C-SiC(111) 薄膜を介して Si(111) 薄膜が形成可能であることを見出した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- [1] Shota Sambonsuge, Shun Ito, Sai Jiao, Hiroyuki Nagasawa, Hirokazu Fukidome, Sergey N. Filimonov, and Maki Suemitsu, "Evaluations of crystal defects of 3C-SiC(-1-1-1) film on Si(110) substrate", *Physica Status Solidi (A)*, 査読有, Vol. 213, Issue 5, May 2016, pp. 1125-1129  
DOI: 10.1002/pssa.201532675
- [2] Shota Sambonsuge, Sai Jiao, Hiroyuki Nagasawa, Hirokazu Fukidome, Sergey Filimonov, and Maki Suemitsu, "Formation of qualified epitaxial graphene on Si substrates using two-step heteroepitaxy of C-terminated 3C-SiC(-1-1-1) on Si(110)", *Diamond and Related Materials*, 査読有, Vol. 67, Mar. 2016, pp. 51-53
- [3] S. Jiao, Y. Murakami, H. Nagasawa, T. Nakabayashi, M. Suemitsu, "High quality graphene formation on 3C-SiC/4H-AIN/Si heterostructure", *Materials Science Forum*, 査読有, Vol. 806, 2015, pp. 89-93

- [4] Mika Hasegawa, Keita Sugawara, Ryota Suto, Shota Sambonsuge, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Sergey Filimonov, Hirokazu Fukidome, and Maki Suemitsu, "In-situ SR-XPS Observations of Ni-assisted Low-Temperature Formation of Epitaxial Graphene on 3C-SiC/Si", *Nanoscale Research Letters*, 査読有, Vol. 10, Oct. 2015, pp. 421-426
- [5] 横山大、今泉京、吹留博一、吉越章隆、寺岡有殿、末光真希、「微量 O<sub>2</sub> 添加アニール法による Si(111)及び Si(100)基板上エピタキシャルグラフェン」, *Spring-8/SACLA 利用研究成果集*, 査読有, Vol. 3, 2号、2015年7月、pp. 356-359
- [6] Hiroyuki Nagasawa, Ramya Gurunathan, and Maki Suemitsu, "Controlling Planar Defects in 3C-SiC: Ways to Wake it up as a Practical Semiconductor", *Materials Science Forum*, 査読有, Vol. 821-823, June 2015, pp. 108-114
- [7] S. Sambonsuge, L.N. Nikitina, Yu. Yu. Hervieu, M. Suemitsu, S.N. Filimonov, "Silicon Carbide on Silicon (110): Surface Structure and Mechanisms of Epitaxial Growth", *Russian Physics Journal*, 査読有, Vol. 56, Mar. 2014, pp. 1439-1444
- [8] Maki Suemitsu, Sai Jiao, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tateno, Isao Makabe, Takashi Nakabayashi, "Epitaxial graphene formation on 3C-SiC/Si thin films", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 査読有, Vol. 47, Feb. 2014, pp. 094016

〔学会発表〕(計 25 件)

- [1] Maki Suemitsu, "Recent Progress in the Epitaxial Graphene Formation on 3C-SiC/Si substrates," 2016 MRS Spring Meeting & Exhibit (invited), March 31, 2016, Phoenix, AZ, USA.
- [2] Maki Suemitsu, "Recent progress in epitaxial graphene on bulk and thin film SiC crystals," International symposium on emerging functional materials (invited)," Nov. 6, 2015, Songo Convensia, Incheon, Korea.
- [3] 長澤弘幸、末光真希「SiC エピタキシャル成長技術とポリタイプ積層」第 45 回結晶成長国内会議 (NCCG-45) 2015 年 10 月 20 日、札幌
- [4] Mika Hasegawa, Kenta Sugawara, Ryota Suto, Shota Sambonsuge, Yuden Teraoka, Akitaka Yoshigoe, Sergey Filimonov, Hirokazu Fukidome, Maki Suemitsu, "Ni-assisted low-temperature formation of epitaxial graphene on 3C-SiC/Si and real-time SR-XPS analysis of its reaction," 2015 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Oct. 6, 2015, Giardini, Naxos, Italy.

- [5] Maki Suemitsu, “Epitaxial graphene formation on SiC and Si substrates,” Physical Sciences Symposia-2015,” (invited), Sept. 22, 2015, Cambridge, MA, USA.
- [6] 横山大、フィリモノフ・セルゲイ、長澤弘幸、吹留博一、末光眞希「Si(110)上 3C-SiC(111)薄膜の結晶方位回転成長機構」第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年 9 月 15 日、名古屋国際会議場
- [7] Maki Suemitsu, “Formation of qualified epitaxial graphene on Si substrates using two-step heteroepitaxy of C-terminated 3C-SiC(-1-1-1) on Si(110), International Conference on Smart Engineering of New Materials,” June 23, 2015, Lodz, Poland.
- [8] Maki Suemitsu, “Evaluation of crystal defects of 3C-SiC(-1-1-1) film on Si(110) substrate,” International Conference on Smart Engineering of New Materials,” June 23, 2015, Lodz, Poland.
- [9] 須藤亮太、末光眞希「高品質エピタキシャルグラフェンを用いた GFET の特性評価」第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 14 日、平塚
- [10] M. Suemitsu, “Growth of epitaxial graphene on SiC and its application to FET,” (invited), 2<sup>nd</sup> Malaysia Graphene and Carbon Nanotube Workshop (MGCW2014), Oct. 20, 2014, Kuala Lumpur, Malaysia
- [11] 末光眞希「グラフェンのディスプレイ応用の可能性」(招待講演)CEATEC JAPAN / 電子ディスプレイ研究専門委員会 (EID), 2014 年 10 月 9 日、幕張、千葉
- [12] M. Suemitsu, “Heteroepitaxy of 3C-SiC on Si and Formation of Epitaxial Graphene,” (invited), Asia-Pacific Symposium on Solid Surfaces, Sept. 30, 2014, Vladivostock, Russia
- [13] H. Nagasawa and M. Suemitsu, “Controlling Planar Defects in 3C-SiC: Ways to Wake it up as a Practical Semiconductor” (Key note talk), European Conf. on Silicon Carbide and Related Materials, Sept. 22, 2014, Grenoble, France
- [14] M. Suemitsu, “Epitaxial Graphene on Silicon Substrates: Tailoring the Properties through Crystal Face,” (invited), 2014 Tsukuba Nanotechnology Symposium (TNS’14), July 26, 2014, Tsukuba, Japan
- [15] 末光眞希「シリコン基板上 3C-SiC のガスソース MBE 成長とグラフェン・オン・シリコン技術」(招待講演)第 11 回 Cat-CVD 研究会、2014 年 7 月 12 日、仙台
- [16] M. Suemitsu, “Graphene based Electronic & Photonic Devices, Circuits and Systems,” EXMATEC 2014 (invited), June 19, 2014, Delphi, Greece.
- [17] 三本菅正太、長澤弘幸、伊藤駿、吹留博一、末光眞希、「Si(110)基板上 3C-SiC(111)結晶方位回転エピ膜の断面 TEM 評価」SiC 及び関連半導体研究会第 22 回講演会、2013 年 12 月 9 日、浦和
- [18] 原本直樹、長澤弘幸、伊藤駿、吹留博一、末光眞希、「微傾斜 Si(111)基板上 3C-SiC(111)薄膜の断面 TEM 評価」SiC 及び関連半導体研究会第 22 回講演会、2013 年 12 月 9 日、浦和
- [19] 細谷友崇、三本菅正太、長澤弘幸、伊藤駿、吹留博一、末光眞希、「3C-SiC/Si(111)ヘテロエピタキシャル界面から発生する積層欠陥の抑制」SiC 及び関連半導体研究会第 22 回講演会、2013 年 12 月 9 日、浦和
- [20] N. Haramoto, S. Inomata, S. Sambonsuge, H. Fukidome, and M. Suemitsu, “XRD and Raman-Spectroscopic Evaluation of Graphene on 3C-SiC(111)/vicinal Si(111) Substrate,” ALC’13, Dec. 5, 2013, Hawaii, USA.
- [21] S. Filimonov, Yu. Hervieu, S. Jiao, S. Sambonsuge, and M. Suemitsu, “Surface Energy Anisotropy of Clean and Hydrogen Covered 3C-SiC Surfaces,” ACSIN-12, Nov. 6, 2013, Tsukuba, Japan.
- [22] S. Jiao, H. Fukidome, H. Nagasawa, S. Filimonov, Y. Tateno, I. Makabe, T. Nakabayashi and M. Suemitsu, “Epitaxial Graphene Formation on 3C-SiC(111)/4H-AlN(0001) Double Layer Stacking on Si(111) Substrates,” The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Oct. 3, 2013, Miyazaki, Japan.
- [23] Sai Jiao, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tateno, Takashi Nakabayashi and Maki Suemitsu, “From 3C-SiC growth to graphene formation using 4H-AlN(0001)/Si(111) heterostructure,” 2013 JSAP-MRS Joint Symposium, Sept. 18, 2013, Kyoto, Japan.
- [24] 三本菅正太、長澤弘幸、Sergey Filimonov、伊藤駿、吹留博一、末光眞希「Si(110)基板上 3C-SiC(111)回転エピ膜上に形成したエピタキシャルグラフェンの断面 TEM 評価」第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、2013 年 9 月 17 日、京都
- [25] S. Jiao, Y. Murakami, Y. Tateno, T. Nakabayashi, H. Fukidome, M. Suemitsu, “High quality graphene formation on 3C-SiC/4H-AlN/Si heterostructure,” HeteroSiC-WASMPE2013, June 18, 2013, Nice, France

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

末光 眞希 (SUEMITSU, Maki)  
 東北大学・電気通信研究所・教授  
 研究者番号：00134057